

# Fabricación de adoquines con caucho de llantas recicladas para adecuar espacios de juegos infantiles

Laura Cristina Durango Mazo 1<sup>a</sup>, Karen Lorena Mosquera Hurtado 2<sup>a</sup> ,

Luz Elena Alzate Usma<sup>b</sup>,

<sup>a</sup> Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia.

<sup>b</sup> Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

---

## Resumen

Las llantas fuera de uso (LFU) se han convertido en una problemática ambiental que está afectando a las comunidades y al medio ambiente. Las leyes colombianas han regulado la recolección y reutilización de las llantas, por parte de proveedores, comercializadores y demás. Varias empresas se han encargado de recibirlas, procesarlas y hacer una separación de los diferentes materiales que las componen, como el acero, fibras textiles y caucho, los cuales, posteriormente, se venden como materia prima para ser utilizada como base de nuevos productos. La mayoría de los usos que se le ha dado al caucho reciclado de LFU es principalmente para mezclas asfálticas, soportes, adoquines y láminas acústicas, a fin de favorecer la capacidad de amortiguación y aislamiento. Este artículo presenta los resultados de un proyecto de investigación en el cual se fabricaron adoquines a partir de una mezcla de elastómeros, con base en los parámetros de medida de la norma NTC 2017, incorporando el caucho de LFU. El objetivo del proyecto es presentar una propuesta para adecuar espacios de juegos en los hogares comunitarios, conocidos actualmente como hogares agrupados (HA) o Centros de Desarrollo Infantil (CDI) del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), que vele por la seguridad de niños y niñas que asisten a estos lugares. Las propiedades del compuesto técnicamente formulado con caucho reciclado de LFU permiten que el adoquín sea ideal para amortiguar los impactos de caídas; su resiliencia es de 62,3% y su abrasión de 233,37mm<sup>3</sup>. Estos resultados se obtuvieron haciendo variaciones de temperatura y granulometría.

## 1. Introducción

A lo largo del tiempo, las llantas se han convertido en una problemática mundial significativa debido a los altos residuos sólidos que se generan por los LFU. En Estados Unidos son desechadas, aproximadamente, 300 millones de llantas anuales; en Brasil, 30 millones, de 45 millones que son producidas, y en México, 25 millones [1]. En el caso de Colombia, según el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, para el año 2008 el consumo fue de 4.493.092 llantas; de acuerdo con el recambio de llantas realizados cada 18 meses, los residuos generados alcanzan alrededor de 2.995.394 anuales [2]. Considerando que el elastómero que la compone tarda más de 100 años en degradarse, en Colombia, la mayor parte de las llantas desechadas son almacenadas en depósitos clandestinos, patios de casas, lagos, ríos y calles. El mal almacenamiento genera asentamiento y crecimiento de roedores e insectos que transmiten enfermedades perjudiciales como el dengue, la fiebre amarilla, entre otros [3]. En cuanto a los rellenos sanitarios, generan inestabilidad química por la degradación que sufren e impiden la compactación de residuos [3]. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial tiene como función regular y administrar los mecanismos necesarios para el control de los factores de deterioro del ambiente. Estudios realizados por esta entidad muestran que en Colombia se evidencia un problema de medio ambiente debido a la inadecuada disposición de desecho de LFU, como la

quema indiscriminada de este, ya que las LFU poseen un poder calorífico mayor que la madera y podría reemplazar combustibles como el carbón y el petróleo, que son más costosos [14]. Sin embargo, esta quema indiscriminada emite gases con partículas nocivas para el entorno como el dióxido de carbono, azufre y otros componentes que se transportan en el aire y pueden ser absorbidos por la piel de las personas [4].

La constante preocupación por la disposición de los residuos generados por las LFU ha traído consigo el interés por investigar para dar una mejor disposición a tales desechos. En México se propuso la adecuación de un sillón artesanal a partir de llantas recicladas, con un diseño ergonómico, mientras que en Ecuador se han realizado estudios de mercado para la implementación de un adoquín con caucho reciclado, en donde se muestra gran aceptación por parte de los consumidores [5]. Además de esto, la Universidad Central del Ecuador realizó un estudio para comparar las propiedades de flexión y compresión de un adoquín de concreto frente a uno de caucho reciclado; para lograrlo se realizaron adoquines siguiendo la norma NTC 2017. Como resultado se obtuvo una mejor resistencia a la compresión por parte del adoquín de caucho, contrario a lo que se obtuvo en la resistencia a la flexión [6]. En Colombia se han realizado investigaciones para observar el comportamiento de un adoquín convencional con adiciones de caucho de LFU, para esto, se le adiciona a la mezcla base de concreto cantidades variables de caucho reciclado, según lo especificado en las normas ISO 179-2:1997, ASTM D6110-10 y ASTM D575-91(2012). Para medir amortiguación e impacto, se realizaron las respectivas pruebas, las cuales indican que la resistencia a la flexo tracción disminuía para adoquines con adición del 5% y 10% de caucho reciclado[7]. Por otro lado, en Bogotá, la UNAD propuso un proyecto para adecuar los parques infantiles con la utilización de llantas recicladas, sin embargo, se realizó como propuesta y no se llegó a la implementación de dicho proyecto [8]. En la Resolución 1457 de 2010 [3] se establece la normativa aplicada a los productores e importadores de llantas en Colombia con el fin de entablar sistemas para su recolección y gestión ambiental [9]. Las LFU se utilizan para producir energía o, por métodos físicos, extraer los principales componentes de estas [10], reduciendo el tamaño y separando los gránulos de caucho de los demás componentes como acero y fibra .

Empresas como Corpaul, Mundo Limpio, Reciclair se encargan a nivel nacional de hacer esta labor; sin embargo, solo algunas empresas le han dado uso a este polvo de caucho. En Medellín existen empresas como Huella Urbana que hacen diferentes productos como baldosas modulares para gimnasios, parqueaderos y jardines infantiles [11], la forma convencional de fabricar estos productos es aglomerar y prensar el caucho de las LFU con resinas tipo poliuretano. Como bien se sabe, el poliuretano está compuesto por Isocianato, el cual resulta muy perjudicial para la salud de quien lo manipula [12].

El Estado colombiano, según el artículo 41, de la Ley 1098 de 2006 de infancia y adolescencia, debe garantizar en el contexto institucional el desarrollo integral de niños, niñas y adolescentes, así como también asignar los recursos necesarios para el cumplimiento de las políticas públicas de niñez y adolescencia. Como entidad responsable está el ICBF, que se encarga de proteger la cobertura, calidad y atención de manera integral asegurando los servicios que mejoren las condiciones de vida para los niños, niñas y adolescentes [13]. Con el fin de cumplir con lo anterior, el ICBF tiene escenarios de educación inicial como HA y CDI, los cuales deben brindar educación, alimentación, infraestructura y demás recursos de calidad, para atender a niños y niñas de familias clasificadas en los niveles 1 y 2 del SISBÉN [14].

Los HA y CDI deben ser diseñados especialmente para prestar un servicio integral a la primera infancia, y propiciar un ambiente seguro [14]. Dichos centros educativos cuentan con espacios para la recreación y deben ser adecuados buscando minimizar los riesgos [15]. Las lesiones producidas por caídas en el área de juego y que afectan directamente los mecanismos corporales del menor, puede llegar a minimizarse adecuando la superficie del suelo con materiales que proporcionen mayor amortiguación al impacto[16]. No todos los espacios utilizados en los centros ya mencionados son propiedad del ICBF, por lo cual la entidad se ve obligados a alquilar lugares que no cumplen con los requerimientos de seguridad y deben ser adecuados para prestar el servicio a las familias que allí llevan a sus hijos. Al ser sitios alquilados no se justifica realizar modificaciones permanentes, por esto se buscan alternativas económicas y fáciles de reubicar en caso de tener que realizarse un cambio de zona [14].

Teniendo en cuenta la cantidad de LFU que se desecha y la problemática que genera, se quiere contribuir con una solución que le aporte al medio ambiente, al permitir el uso de una fracción de estos residuos sólidos, convirtiéndolos en adoquines que puedan ser utilizados para adecuar jardines infantiles como las instalaciones de HA y CDI.

El proyecto aquí descrito propone la fabricación de una mezcla elastomérica evitando el uso de sustancias nocivas —a diferencia del método convencional— que proporcione buenas propiedades de amortiguación y

resistencia a la abrasión para hacer adoquines a partir de LFU. Además de esto, el proyecto quiere resaltar la labor social que beneficie, no solo al medio ambiente, sino también a niños que frecuentan instalaciones de los HA y/o CDI.

## **2. Metodología**

### **2.1. Materiales y equipos**

#### **2.1.1. Materiales**

- Caucho Natural (NR)
- Caucho recuperado de llanta
- Caucho sintético (SBR)
- Plastificantes
- Activadores
- Acelerantes

#### **2.1.2. Equipos**

- Molino de rodillos abierto (Universidad EAFIT)
- Prensa (Universidad EAFIT)
- Mezclador Banbury (Silicaucho)
- Molino abierto (Silicaucho)

### **2.2 Método de trabajo**

#### **2.2.1. Elaboración del molde**

El molde lo construimos en los talleres de la Universidad EAFIT según la norma NTC-2017, fue diseñado en Solidwoks en conjunto con el equipo del curso de énfasis IP-0661; La norma establece diferentes geometrías para realizar adoquines de concreto, para el proyecto se seleccionó la forma de hueso para facilitar el encaje entre adoquines, de acuerdo a esto se elaboró el plano con las dimensiones que debe tener un adoquín según la norma. Una vez obtenido el diseño el molde fue fabricado en Acero 1045. Con el molde elaborado se determinó el volumen de este y con la densidad de la mezcla se calculó la cantidad requerida para realizar el llenado por masa.

#### **2.2.2. Preparación de la formulación**

Inicialmente se realizó la selección de los cauchos base de la mezcla según la tabla de propiedades de elastómeros de Hexpol [17], en donde se especifica qué tipo de elastómero se debe adicionar a una mezcla de acuerdo con las propiedades que proporciona cada uno de ellos. Conforme a esto, se eligieron los componentes necesarios para favorecer propiedades de amortiguación y abrasión en los adoquines. Tomando en cuenta las proporciones de los componentes utilizados en una formula elastomérica presentada en el manual de Struktol [18], se realizó la formulación para la elaboración de los adoquines, tanto los de prueba como los de implementación. Teniendo presente que el caucho proveniente de LFU contiene partículas de carbono de negro de humo, el cual es utilizado como carga en formulaciones de caucho [19], se decide aprovechar el caucho de LFU para reemplazar las cargas de la mezcla, de esta forma se utiliza el ripio de llanta y no el negro de humo. En la tabla 1 se evidencia la formulación utilizada para el adoquín base con agregado de LFU, el 80% del adoquín final está compuesto de esta mezcla. En la tabla 2 se presenta la formulación para la mezcla de color, esta fue necesaria realizarla debido a que la mezcla base es totalmente negra, lo cual no es estéticamente apropiado para un espacio de juego de niños, por lo tanto se incorpora una lámina de color lo que representa un 20% del total del adoquín. Finalmente, en la tabla 3 se evidencia la formulación de la mezcla estándar, esta se realizó con el fin de elaborar un adoquín de referencia para comparar las propiedades deseadas con respecto a

los adoquines con LFU, esta mezcla contiene los componentes tradicionales de un elastómero, en este caso se incorporan las cargas (negro de humo) anulando el ripio de llanta.

Por otro lado, en el artículo “Thermoplastic elastomeric composition based on ground rubber tire” se menciona que el caucho de llantas recicladas también se puede incorporar hasta en un 50% con otro tipo de elastómeros como el EPDM [20]. Para determinar la cantidad de ripio de llanta a adicionar, se realizaron ensayos de mezclas con diferentes cantidades de ripio partiendo de 20 g, las cantidades se fueron aumentando hasta el punto en que el ripio ya no lograba incorporarse a la mezcla en el molino. De igual forma, cada una de las mezclas de ensayo se sometieron a condiciones de prensado para ver el desprendimiento de las partículas de llanta en el adoquín, de esta manera se determinó que, con una cantidad de 150 g, el ripio de llanta se incorporaba totalmente en la mezcla y no presentaba desprendimiento luego del prensado.

**Tabla 1.** Formulación para el adoquín base

<b>Ingredientes</b>	<b>PHR</b>
Caucho Natural	80
Caucho SBR	20
Ripio de llanta	150
Plastificante	10
Activadores	2
Antioxidantes	1
Acelerantes	3
<b>TOTAL PHR</b>	<b>148</b>

**Tabla 2.** Formulación mezcla de color

<b>Ingredientes</b>	<b>PHR</b>
Caucho Natural	80
Caucho SBR	20
Sílica	30
Plastificante	10
Activadores	2
Antioxidante	1
Acelerantes	3
Color	2
<b>TOTAL PHR</b>	<b>266</b>

**Tabla 3.** Formulación adoquín estándar

<b>Ingredientes</b>	<b>PHR</b>
Caucho Natural	80
Caucho SBR	20
Negro de Humo	30
Plastificante	10
Activadores	2
Antioxidantes	1
Acelerantes	3
<b>TOTAL PHR</b>	<b>146</b>

**PHR:** Partes por 100 de caucho (Per Hundred Rubber), cantidad de cada uno de los componentes con base en el total de la suma de los Elastómeros

### 2.2.3. Determinación del tiempo inicial de vulcanización

A la mezcla preparada inicialmente se le realizó un análisis reométrico en un Reómetro de Corte sin disco por Esfuerzo de Torsión, para determinar el tiempo de vulcanización y la durabilidad del adoquín en el tiempo. En las gráficas 1 y 2 se puede apreciar los resultados para cada tipo de mezcla que se fabricó; con el agregado de LFU, la estándar con el negro de humo y la mezcla de color. Para los tres ensayos, las pruebas arrojaron un tiempo de vulcanizado de 15 min tal y como se muestran en los gráficos 1 y 2 y en las tablas 4 y 5 en donde se refleja el tiempo total del test. Adicionalmente, cada una de las gráficas evidencia un trazo constante en el tiempo, lo que indica una buena durabilidad de la mezcla elastomérica luego de vulcanización; concluyendo que el adoquín no tendrá un deterioro prematuro. La temperatura inicial para las Reometría fue de 165° C, temperatura elegida teniendo en cuenta que el compuesto es una formulación de Caucho Natural y que por ser un Elastómero dienico y sensible a la degradación por temperatura era lo más indicado para observar la caída de la curva en el tiempo, fenómeno conocido como "Plateau".

Según los datos de vulcanización, t90, tiempo para que el valor del torque alcance el 90% de las propiedades finales, se tiene para el grafico 1 y tabla 4, un valor de 2.01 minutos y para el compuesto de color un t90 de 1.85 minutos según grafico 2 y tabla 5

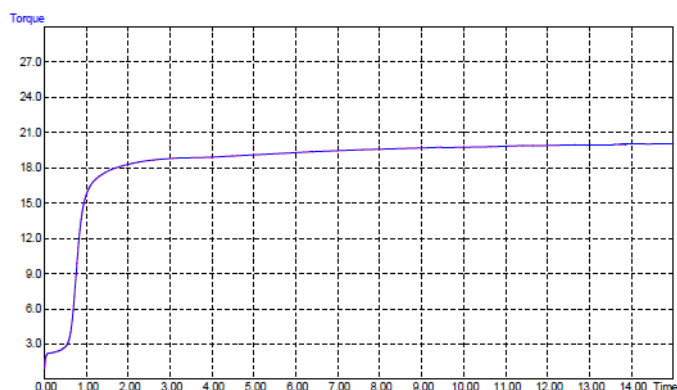


Gráfico 1. Reometría mezcla con LFU

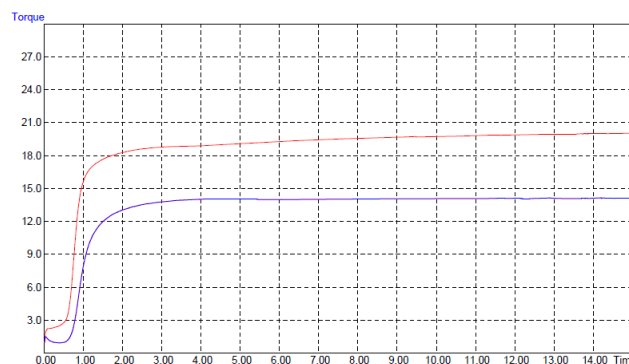


Gráfico 2. Reometría mezcla estándar (azul) y mezcla de color (rojo)

Tabla 4. Reometría mezcla con LFU

Variable	Value	Unit
Test temp	165	°C
Test time	15	min
ML	2.43	dNm
MH	20.04	dNm
ts2	0.64	min
t10	0.64	min
t20	0.69	min
t30	0.73	min
t40	0.77	min
t50	0.81	min
t60	0.86	min
t70	0.93	min
t80	1.11	min
t90	2.01	min
t100		min
MachinedID		

Tabla 5. Reometría mezcla estándar (azul) y mezcla de color (rojo)

Variable	Value	Unit
Test temp	165	°C
Test time	15	min
ML	0.93	dNm
MH	14.14	dNm
ts2	0.78	min
t10	0.73	min
t20	0.81	min
t30	0.86	min
t40	0.92	min
t50	0.98	min
t60	1.05	min
t70	1.17	min
t80	1.37	min
t90	1.85	min
t100		min
MachinedID		

#### 2.2.4. Determinación de temperatura de vulcanización del adoquín y granulometría del ripio de llanta

La temperatura de vulcanización es una variable que influye sobre las propiedades mecánicas como la resistencia a la carga[1], por lo tanto, en el proyecto se decidió tomar la temperatura como una variable que puede influir en el porcentaje de resiliencia y se varió entre (155-165)°C. El rango de temperatura se definió teniendo en cuenta que a una temperatura de ensayo menor a 155°C se presentaban dificultades al momento de desmoldar el adoquín, el cual se quedaba adherido al molde y se deformaba ya que no completaba su ciclo de vulcanización en 15 minutos. El tiempo de ensayo de 15 minutos de vulcanización se deduce con base en la reometría inicial cuyo tiempo fue de 2.01 minutos a 165°C para un espesor de probeta de 3 mm aproximadamente, lo cual se traduce en un tiempo cercano a los 8 minutos para un espesor de 12 mm que es lo que mide el adoquín.

Adicional al ensayo de variación de temperatura, se decide variar la granulometría del caucho de LFU para ver su influencia en la resiliencia y abrasión, esta última se define como “la pérdida de material cuando una probeta bajo condiciones estándar se somete a un recorrido en papel abrasivo según norma para evaluar el desgaste” [27]. El ripio de caucho de LFU, donado por la empresa Mundo Limpio, presenta diferentes tamaños de partículas con diámetros diferentes y sin especificar, motivo por el cual se realizó una caracterizaron mediante análisis granulométrico según se indica en la tabla siguiente:

**Tabla 9.** Granulometrías del ripio

Reciclado de Llanta	µm
Tamaño 1-Pequeño	187,5
Tamaño 2-Mediano	1765
Tamaño 3-Grande	2350

El ripio de LFU normalmente viene contaminado con trazas de metal por tanto, fue fundamental extraerlas con imán para evitar daños en las máquinas de procesamiento como el molino y la prensa.

Con las variables ya establecidas se tenía como objetivo realizar un diseño de experimentos 32; sin embargo, no fue posible elaborar réplicas, pues los valores de los ensayos excedían el presupuesto disponible, por lo tanto, solo se realizaron nueve ensayos variando las condiciones ya descritas. Para ello se vulcanizaron adoquines de prueba y fueron llevados al Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y el Caucho (ICIPC). Inicialmente, el objetivo era evaluar el impacto y resiliencia con base en las normas ISO 179-2:1997, ASTM D6110-10 y ASTM D575-91(2012); no obstante, el ICIPC se basa en la norma ASTM D7121-05 de resiliencia, entendida como “el porcentaje de elasticidad de un compuesto de caucho como una indicación de la pérdida de energía histérica que también se puede definir por la relación entre el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida. El porcentaje de rebote medido es inversamente proporcional a la pérdida de histéresis” [28]. Teniendo en cuenta que la resiliencia mide la amortiguación en elastómeros los resultados se determinaron según la norma anteriormente mencionada, cumpliendo de igual manera el objetivo de determinar amortiguación por rebote (resiliencia) para la mezcla formulada, considerando que un porcentaje alto indica una mejor resiliencia [21]. Una vez evaluada la resiliencia, a las tres muestras con mejor porcentaje del mismo se les realizaron pruebas de abrasión para medir el desgaste que tienen los adoquines al tener un agregado de LFU y de esta forma determinar las condiciones de temperatura y granulometría que dan mejores indicadores de las propiedades medidas.

Para los adoquines de ensayo se utilizó la misma fórmula establecida para los adoquines base (tabla 1), los compuestos se pesaron y se mezclaron en el laboratorio del primer piso del edificio de Ingenierías de la Universidad EAFIT. El proceso de vulcanización se hizo en la prensa ubicada en el mismo piso del laboratorio. La muestra estándar se realizó de igual manera utilizando la formulación descrita en la Tabla 3.

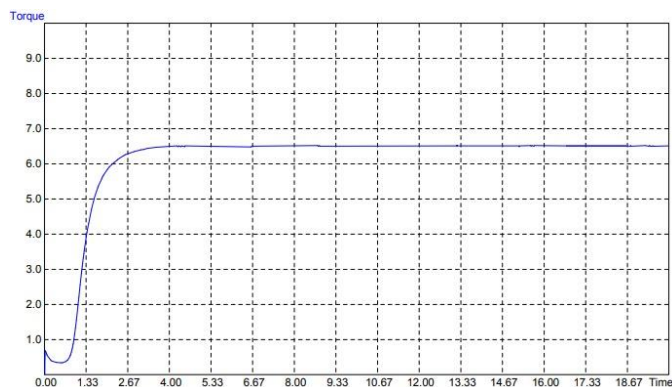


Gráfico 3. Reometría de NR a 160°C

Tabla 6. Reometría de NR a 160°C

Variable	Value	Unit
Test temp	160	°C
Test time	20	min
ML	0.34	dNm
MH	6.53	dNm
ts2	1.12	min
t10	0.93	min
t20	1.03	min
t30	1.10	min
t40	1.18	min
t50	1.26	min
t60	1.36	min
t70	1.50	min
t80	1.69	min
t90	2.08	min
t100		min
MachinedID		

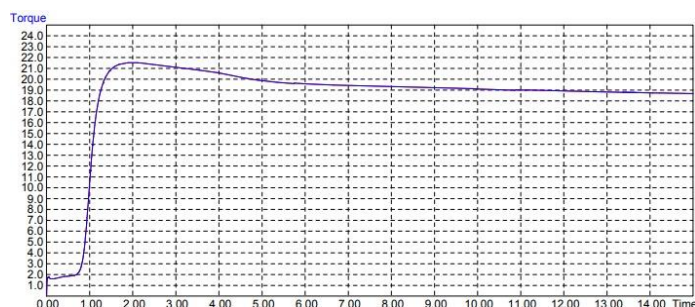


Gráfico 4. Reometría de NR a 165°C

Tabla 7. Reometría de NR a 165°C

Variable	Value	Unit
Test temp	165	°C
Test time	15	min
ML	1.60	dNm
MH	21.53	dNm
ts2	0.85	min
t10	0.85	min
t20	0.91	min
t30	0.95	min
t40	0.98	min
t50	1.02	min
t60	1.06	min
t70	1.11	min
t80	1.18	min
t90	1.30	min
t100		min
MachinedID		

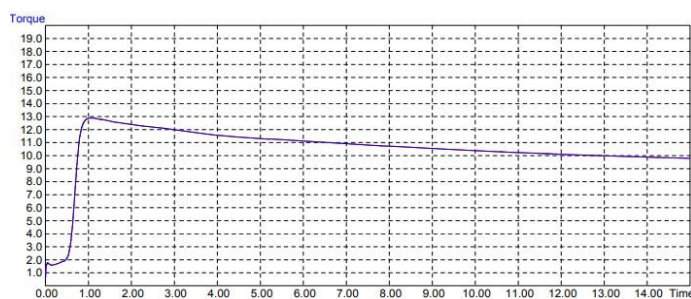


Gráfico 5. Reometría de NR a 200°C

Tabla 8. Reometría de NR a 200°C

Variable	Value	Unit
Test temp	200	°C
Test time	15	min
ML	1.59	dNm
MH	12.89	dNm
ts2	0.60	min
t10	0.56	min
t20	0.61	min
t30	0.64	min
t40	0.66	min
t50	0.69	min
t60	0.71	min
t70	0.74	min
t80	0.77	min
t90	0.82	min
t100		min
MachinedID		

## 2.2.5 Elaboración de los adoquines para el prototipo

Una vez definida la temperatura, la granulometría y el tiempo de vulcanización, se llevó a cabo la elaboración de los adoquines para el prototipo. Debido a la baja capacidad del molino del laboratorio de la Universidad Eafit, la elaboración de la mezcla para los adoquines finales se llevó a cabo en las instalaciones de Silicaucho, empresa especialista en soluciones en materiales elastoméricos para la industria, iniciando con la homogenización de los materiales seleccionados según la formulación (tabla 1 y 2), en donde se utilizó el Banbury para una premezcla del caucho natural con caucho sintético, ripio y antioxidante. Luego, la mezcla se dejó en reposo para evitar que se calentara y vulcanizara en la siguiente etapa. Una vez obtenida la mezcla reposada, se llevó al molino de rodillos y se adicionaron los acelerantes y activadores [22]. Finalmente, al tener homogenizados todos los componentes, en el molino, se laminó al espesor requerido según la profundidad del molde.

Por último, se realizó la homogenización de los componentes descritos en la tabla 2 para obtener la mezcla de color en el molino de rodillo siguiendo el procedimiento anteriormente mencionado. El producto; tanto la

mezcla base como la de color fueron cortadas con la forma del molde para continuar con la fase de ciclo de vulcanización bajo condiciones de presión y temperatura en la prensa de la universidad EAFIT.

### 2.2.6. Propuesta del proyecto

La última fase del proyecto consistió en la elaboración del prototipo y un modelo de propuesta para el ICBF según los requerimientos presentados por este, para esto se consultaron los diferentes modelos para presentar una propuesta al ICBF con el objetivo de tener en cuenta la adecuación con adoquines como posible alternativa en las instalaciones de HA y CDI.

## 3. Resultados y análisis

### 3.1. Evaluación del adoquín

Se siguieron las especificaciones de la norma NTC 2017 para la construcción del molde, al realizar ensayos en el mismo, se evidenció que el adoquín cumple con las especificaciones de la norma, sin embargo, fue necesario disminuir el espesor 9mm a fin de tener un adoquín más liviano, para facilitar su manejo. En la ilustración 1 se puede ver el resultado final del molde.

**Ilustración 1.** Molde del adoquín.



### 3.2. Determinación de la temperatura y la granulometría

La amortiguación del adoquín se midió mediante el ensayo de resiliencia por rebote, aplicado a las nueve muestras realizadas variando la temperatura (155-165)°C y la granulometría (187.5-2350)  $\mu\text{m}$  y posteriormente fueron enviadas al ICIPC, los resultados se presentan en la Tabla 4. Debido a la falta de réplicas y a las pocas diferencias significativas que se presenta en los resultados, no se pudo realizar un análisis estadístico profundo, por lo que se hace un histograma con ajustes agrupando la resiliencia con las variables de temperatura y granulometría [23]. En el Gráfico 3 se observa cómo las diferentes temperaturas tienen una influencia leve sobre la resiliencia, mostrando que a temperaturas de vulcanización de 155°C y 165°C se presenta un mejor porcentaje de resiliencia, tomando la primera como la mejor con un porcentaje de resiliencia de 62,3%.

En la práctica el tiempo de vulcanización se duplica para un rango de variación de la temperatura de 10°C aproximadamente. De acuerdo a esto, y teniendo en cuenta que las propiedades de envejecimiento para un compuesto de caucho natural son mejores a menor temperatura, se elige una temperatura de vulcanización de 155°C durante 15 minutos. Aún así, el porcentaje de resiliencia a temperatura de 155 y 165°C no presenta gran variación entre ellos (ver table 10).

En el Gráfico 6 se puede mirar la influencia de la granulometría en la resiliencia, los tamaños de partícula 2350 $\mu\text{m}$  y 187,5 $\mu\text{m}$  muestran altos porcentajes de resiliencia con mayor densidad de datos en 2350 $\mu\text{m}$ . En general los datos de resiliencia fueron muy favorables comparados con los que presenta la literatura. En el artículo “The measurement of resilience with a scanning probe microscope” se evalúan los porcentajes de resiliencia para diferentes fórmulas, las cuales varían entre 51% y 86%, entendido que a mayor porcentaje mejor es la resiliencia [21]. A las baldosas se les hacen diferentes ensayos buscando que sean seguras para el usuario,

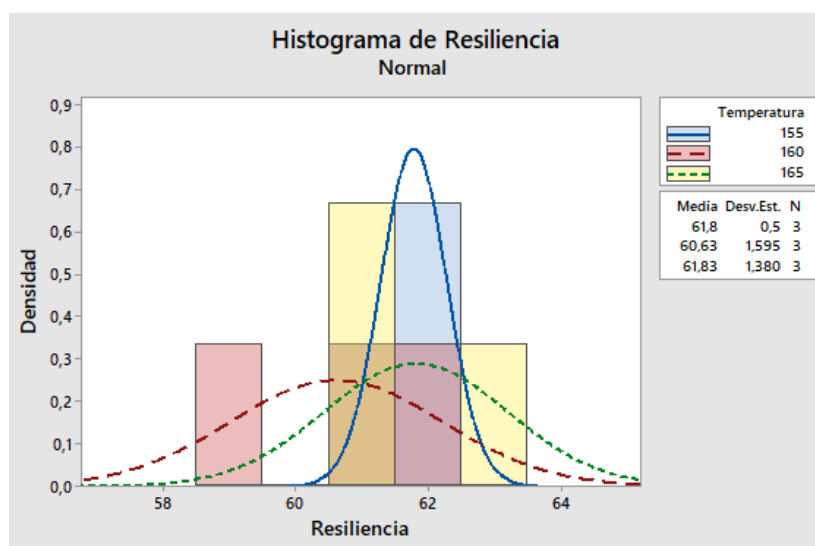


como durabilidad en el tiempo, resistencia química, fricción, entre otros [24]; pero en cuanto a la resiliencia no es posible compararlo frente al adoquín ya que no se encuentran informes en el que se reporten la aplicación de las pruebas de resiliencia en cerámicos, sin embargo se les realiza pruebas de impacto [25], pero no es comparable una prueba de impacto en baldosas con una prueba de resiliencia en adoquines de caucho.

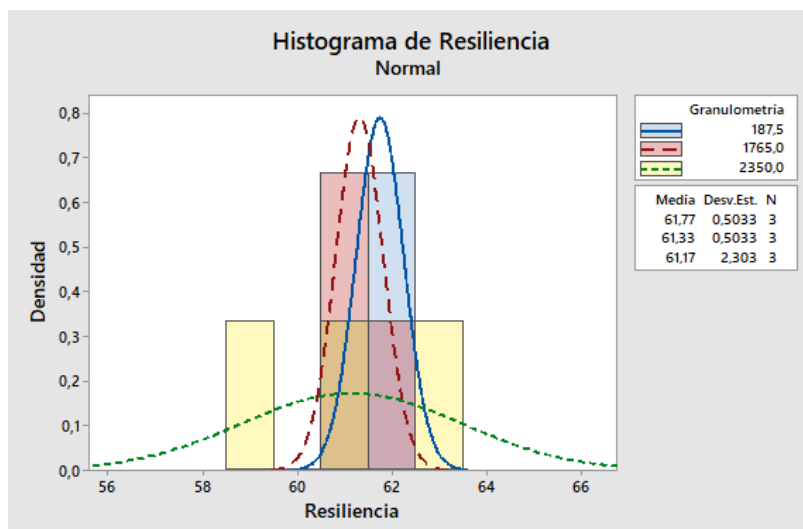
Para finalizar, los resultados de las pruebas de abrasión asociadas al valor de resiliencia, reflejaron que la **temperatura de ensayo de 155°C** y con el grano medio (1765µm) fue la mejor opción para la formulación y vulcanización de los adoquines (211 mm<sup>3</sup>), entendiendo que entre menor sea el resultado, mejor es la abrasión. Sin embargo tiene mayor importancia para nosotros la resiliencia, ya que garantiza una disminución en el riesgo de lesión por caída de los niños, con lo cual, se decide trabajar con una temperatura de 155°C y una granulometría de 187,5 µm, adicional a esto, el adoquín tiene una lámina de color con la formulación similar a la mezcla estándar, por lo tanto las propiedades en cuanto a abrasión de la mezcla estándar son las mismas que la de la mezcla de color, garantizando una buena abrasión, evitando de esta forma un mayor desgaste del adoquín y previniendo caídas de los niños por deslizamiento .

**Tabla 10.** Resultados de resiliencia y abrasión

Temperatura (°C)	Granulometría (µm)	Resiliencia (%)	Abrasión (mm <sup>3</sup> )
155	2350	61,3	-
160	1765	61,4	-
165	187,5	61,3	-
155	1765	61,8	211,58
160	187,5	61,7	-
165	2350	63,4	210,37
155	187,5	62,3	233,37
160	2350	58,8	-
165	1765	60,8	-
Estándar		69,5	156,62



**Gráfico 6.** Histograma resiliencia y temperatura



**Gráfico 7.** Histograma resiliencia y granulometría

### 3.3. Planteamiento de propuesta

Teniendo en cuenta la temperatura y la granulometría que mejores condiciones de resiliencia y abrasión proporcionaban en los ensayos, se realizaron 70 adoquines para adecuar un HA, ubicado en Bello (Antioquia); el lugar es una casa tomada en alquiler por el ICBF, ya que en el sector no cuentan con un espacio propio. El inmueble presentaba espacios poco adecuados para evitar lesiones por caídas de los niños durante sus actividades. Esta situación facilitó el poder acondicionar algunas áreas con el recubrimiento en adoquines para disminuir la probabilidad de riesgo de accidente en caso de una caída. Se inspeccionó el sitio y se instalaron los adoquines en el área de juego mayor frecuencia de juego de los niños para evaluar la muestra de un prototipo de adecuación con los adoquines, mostrando una gran aceptación por parte de los niños y de la madre comunitaria del HA.

Para el planteamiento de la propuesta al ICBF, de los modelos para la presentación de propuestas al ICBF consultadas, se seleccionó un formato para la presentación de proyectos de investigación externos, el cual se ajustaba a las características del proyecto desarrollado, dicho formato fue diligenciado y puede consultarse en los anexos. Adicional a esto, se anexó el prototipo implementado en el HA en la propuesta del proyecto, en las ilustraciones 1 y 2 se puede observar el prototipo en uso.

Con este proyecto se pretende dar alternativas al ICBF para adecuar espacios de juegos de HA y CDI, ya que al momento de realizar la implementación del prototipo la Madre Comunitaria expresó que en ocasiones las dueñas del HA no tenían los recursos para adecuar los espacios de juego y el ICBF ejercía presión para adecuarlos con recursos de las madres, con lo cual los adoquines serían propiedad del ICBF y esta institución podría instalar los adoquines necesarios y una vez la madre comunitaria decidiera no seguir en vínculo con el ICBF, este puede retirar los adoquines y reutilizarlos en la adecuación de otro HA y/o CDI.



**Ilustración 2.** Prototipo de instalación



**Ilustración 3.** Uso del prototipo

#### 4. Conclusiones

Es posible aplicar la norma NTC 2017 diseñada para adoquines de concreto a la fabricación de adoquines con LFU; si se desea obtener un adoquín más liviano, se puede reducir su espesor, esto con el fin de facilitar su manejo.

El adoquín fabricado con las condiciones determinadas presenta propiedades de resiliencia de 62,3% y abrasión de 233,37mm<sup>3</sup>. Al comparalas con una mezcla patrón, la cual presenta una resiliencia de 69,5% y abrasión 156,62 mm<sup>3</sup>, se evidencia que el adoquín con LFU en cuanto a la resiliencia se acerca al valor referido, aunque los resultados obtenidos en este trabajo revelen una influencia leve de la temperatura y la granulometría con respecto a la resiliencia. En cuanto a la abrasión se obtienen buenos resultado en el adoquín con LFU, considerándolo como un material que proporciona seguridad evitando posibles caídas por deslizamiento en espacios de juegos de niños. Adicionalmente, el agregado de LFU se comportó de manera favorable en los adoquines, por lo tanto, se puede decir que es una buena alternativa para su uso.

Por falta de réplicas no se encontró diferencia significativa entre los factores, por lo tanto, se sugiere hacer más ensayos en los que se puedan hacer replicas para identificar de forma más profunda su interacción y definir de manera precisa las condiciones ideales para alcanzar los mayores porcentajes de resiliencia.

En cuanto al diseño del prototipo para la presentación de la propuesta, se evidencia que es posible presentar por medio de un formato, un proyecto de investigación externo a entidades como el ICBF con el fin de contribuir a la seguridad de los niños. Con esto se evidencia la posibilidad de utilizar recursos que se consideran como desechos para contribuir al bienestar social, en este caso de los niños que asisten a instalaciones del ICBF.

#### 5. Tabla de Anexos o Apéndices

**Tabla 5.** Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombre	Desarrollo (propio/terceros)	Tipo de Archivo	Enlace google drive ( <a href="https://goo.gl/">https://goo.gl/</a> )
Formato para la presentación de proyectos externos (ICBF)	Propio	Documento pdf	<a href="https://drive.google.com/file/d/143rY6wEl4BDaSTfkeYM5JtNOzDvWeTH/view">https://drive.google.com/file/d/143rY6wEl4BDaSTfkeYM5JtNOzDvWeTH/view</a>

## Referencias

- [1] H. A. Rondón-Quintana, Y. Molano-Mora, and A. M. Tenjo-Lancheros, "Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas," *Tecno Lógicas*, vol. 0, no. 29, pp. 13–31, 2012.
- [2] V. Y. D. T. EL MINISTRO DE AMBIENTE, *RESOLUCIÓN 1457 DE 2010*. 2010.
- [3] Colfecar, "Reciclaje de llantas: Maximizar su vida útil y desecharlas correctamente," vol. 1, p. 12, 2014.
- [4] S. Alexander Burbano Magaña Oscar Fernando Centeno Ariza, "CASO APLICADO DE ANALISIS DE MERCADO PARA EL NEGOCIO DE REENCAUCHE EN COLOMBIA, COMO ALTERNATIVA DE SOLUCION AL DESECHO GENERADO POR LAS LLANTAS DE CAMION."
- [5] Y. D. Xochimitl, B. P. Victorino, and A. R. Torres, "Sillón Artesanal De Llantas Recicladas De Vehículos," *Rev. Didact. Ambient.*, vol. 12, no. ;aro 2013, pp. 13–23, 2013.
- [6] A. M. Cuzco Naranjo and A. María, "Análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre el adoquín convencional y el adoquín de caucho," 2015.
- [7] S. M. Plazas Riaño, G. A. Gamba Valenzuela, smanuelapr@gmail.com, and gusgamba@hotmail.com, "Caracterización de las Propiedades Mecánicas de Adoquines de Concreto con Adición de ResiduodDe Caucho Reciclado Producto de Llantas Usadas," 2016.
- [8] M. A. Serrano Camacho and M. Alejandra, "Proyecto de adecuación de parques con el uso de llantas recicladas en la localidad de Teusaquillo de la ciudad de Bogotá," 2015.
- [9] A. Pehlken and D. H. Müller, "Using information of the separation process of recycling scrap tires for process modelling," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, pp. 140–148, 2009.
- [10] C. Zárate Velandia, "VALORACIÓN DE 3 MÉTODOS DE RECICLAJE DE LLANTAS PARA IMPLEMENTAR EN EL MUNICIPIO VALORACIÓN DE 3 MÉTODOS DE RECICLAJE DE LLANTAS PARA IMPLEMENTAR EN EL MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO."
- [11] Gicomer S.A.S., "Huella Urbana." [Online]. Available: <http://www.huellaurbana.com/nosotros/>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [12] L. Aguado Alonso and D. Mariano González Cortina, "RECICLADO DE NEUMÁTICOS PARA LA FABRICACIÓN DE LÁMINAS IMPERMEABILIZANTES EN LA CONSTRUCCIÓN."
- [13] Instituto Colombiano de Bienestar Familiar-Coordinación de Infraestructura, "LINEAMIENTOS CENTROS ZONALES CON CALIDAD," 2013.
- [14] Ministerio de Educación Colombiano, *LINEAMIENTOS PARA LA DESTINACIÓN DE LOS RECURSOS DISTRIBUIDOS POR EL COMP ES 115, PROVENIENTES DEL CRECIMIENTO REAL DE LA ECONOMÍA, SUPERIOR AL 4% DE LA VIGENCIA 2006.* .
- [15] Ministerio de la Protección Social Instituto Colombiano de Bienestar Familiar Dirección Administrativa Grupo Infraestructura Inmobiliaria, "Características y especificaciones programas Hogares Agrupados."
- [16] AENOR, *UNE-EN 1177 Revestimientos de las superficies de las áreas de juego absorbedores de impacto*. 2008, pp. 5–19.
- [17] S. Gravity, P. Set, C. Set, T. Strength, A. Resistance, and E. Conductivity, "Field Technical Services : Rubber Compounds Formulated for the Roller Industry," 1983.
- [18] Struktol, "MANUAL DEL CAUCHO," 2014.
- [19] P. Song, X. Zhao, X. Cheng, S. Li, and S. Wang, "Recycling the nanostructured carbon from waste tires," *Compos. Commun.*, vol. 7, no. November 2017, pp. 12–15, 2018.
- [20] A. K. Naskar, A. K. Bhowmick, and S. K. De, "Thermoplastic elastomeric composition based on ground rubber tire," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 41, no. 6, pp. 1087–1098, Jun. 2001.
- [21] M. G. Huson and J. M. Maxwell, "The measurement of resilience with a scanning probe microscope," *Polym. Test.*, vol. 25, no. 1, pp. 2–11, Feb. 2006.
- [22] Joseph P. KennedyJudit E. PuskasGabor KaszasWilliam G. Hager, "Thermoplastic elastomers of isobutylene and process of preparation," 16-Dec-1988.
- [23] J. L. Devore, *Probabilidad y estad stica para ingenier a y ciencias*. International Thomson, 2008.

- [24] J. R. Baena, “Baldosas cerámicas y gres porcelánico: Un mundo en permanente evolución,” *Cent. Editor. Fac. Minas UdeA*, 2011.
- [25] ICONTEC, “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. BALDOSAS CERÁMICAS. PARTE 5: MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL IMPACTO POR MEDIO DEL COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN ISO 10545-5:1996,” 1997.
- [26] P. J. E. E. Navarro, “REQUISITOS TECNICOS DE BALDOSAS CERAMICAS PARA USOS CONCRETOS.”
- [27] ASTM D5963-04(2015), Standard Test Method for Rubber Property—Abrasion Resistance
- [28] ASTM D7121-05(2012), Standard Test Method for Rubber Property—Resilience Using Schob Type Rebound Pendulum, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012